第 38 卷第 3 期 2018 年 2 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.38,No.3 Feb.,2018

DOI: 10.5846/stxb201612062513
彭文君, 舒英格.喀斯特山区县域耕地景观生态安全及演变过程.生态学报,2018,38(3):852-865.
Peng W J,Shu Y G.Analysis of landscape ecological security and cultivated land evolution in the Karst mountain area.Acta Ecologica Sinica,2018,38(3): 852-865.

喀斯特山区县域耕地景观生态安全及演变过程

彭文君[1], 舒英格[1,2,*]
1 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025
2 贵州大学农学院, 贵阳 550025

摘要:为探讨喀斯特山区耕地生态环境变化状况,基于景观生态安全理论,以贵州省赤水市耕地景观为研究对象,选取景观生态安全指数、景观接近度指数、景观类型斑块破碎度、景观类型边界破碎度、景观类型斑块优势度指数、景观分离度指数、景观脆弱度指数等 7 个景观指数构建喀斯特山区耕地景观生态安全评价模型,分析 2000—2014 年研究区耕地景观生态安全的演变过程,试探耕地生态安全重心转移方向和驱动因素。结果表明:1)近 15 年来赤水市耕地景观生态安全重心向西北方向移动,耕地景观斑块密度、分形维数、破碎度下降,斑块形状指数、连接度上升,耕地形状逐渐向复杂状态转变,且分布趋于均匀化,斑块变得越来越群聚。2)耕地面积持续减少、生态安全性不断降低,旱地景观生态安全Ⅰ级区(危险区)向东南部地区扩张,Ⅲ级区(安全区)向Ⅱ级区(相对安全区)转变,Ⅱ级区向Ⅰ级区转变;水田景观生态安全Ⅱ级区由集中呈发散分布,Ⅲ级区向Ⅱ级区、Ⅰ级区转变,旱地和水田景观的生态安全不容乐观。3)通过灰色关联分析得出对研究区旱地景观生态安全演变及重心转移影响最大的因素是农业总产值,其次是粮食产量和农作物播种面积;对水田景观影响最大的是粮食产量,其次是单位化肥施用量和人口密度。

关键词:耕地;景观生态安全;演变;喀斯特山区

Analysis of landscape ecological security and cultivated land evolution in the Karst mountain area

PENG Wenjun[1],SHU Yingge[1,2,*]
1 *School of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang* 550025, *China*
2 *School of Agriculture, Guizhou University, Guiyang* 550025, *China*

Abstract: The ‘No.1 Central Document’ issued in 2016 pushed the ‘three rural issues’ to the cusp. As an important component of the agricultural landscape, the features of the farmland landscape would directly affect the inside ecological processes and productivity of cultivated land, so as to finally decide whether the food problem of the 1.3 billion people in China can be solved or not. In order to investigate changes in the ecological environment of cultivated land in the Karst mountain area on the basis of landscape ecological security theory, the farmland of Chishui City (Guizhou Province, China) was selected as the research object in this essay. Firstly, datas like patch density, patch shape index, patch fractal dimension and patch stability factor were picked out and be used in order to analyse the characteristics of landscape patch evolution and spatial distribution of landscape pattern in the Karst mountain area. Secondly, a landscape ecological security evaluation model for farmland in the Karst mountain area should be constructed to analyze the evolution of the cultivated land's landscape ecological security from 2000 to 2004. In this step, ecological security index, patch proximity index, patch fragmentation, patch boundary fragmentation, landscape type patch dominance index, separation index, and landscape

基金项目:国家自然科学基金项目(31460133)
收稿日期:2016-12-06; **网络出版日期:**2017-10-18
*通讯作者 Corresponding author.E-mail: maogen958@163.com

fragile index were used. Thirdly, on this basis of the past two steps, the centroid method commonly used in geography and economics was introduced to calculate the gravity center of the landscape ecological security of cultivated land. In the same time, both the gravity transfer distance model and the moving direction model were used to measure the distance and direction of the ecological safety center of cultivated landscapes. Finally, to explore the driving factors of ecological safety evolution and center of gravity shifts based on regional characteristics, 10 indices were selected, namely, population density, proportion of agricultural population, rate of regional construction land, grain yield, unit of cultivated land fertilizer, arable area, gross output value of agriculture, per capita disposable income of farmers, crop sown area, and number of rural practitioners, and a grey correlation analysis was performed for changes in the indices and changes in the ecological security indices of the cultivated landscape.The results showed as follow. Firstly, in the recent 15 years, the ecological security center of gravity of cultivated land landscape in Chishui moved to the Northwest. Meanwhile the patch density, fractal dimension, and fragmentation decreased, the patch shape index and connection degree increased. The shape of the cultivated land gradually changed to a complex state, and the distribution tended to be homogeneous, whereas the patches became increasingly clustered. Secondly, arable land continued to decline, ecological safety decreased. According to the landscape ecological security index of cultivated land calculated results, it could be seen that the ecological security zone of dry land landscape was expanding to the southeast, and the safe areas was changed to the the relatively safe areas, and the relatively safe areas was changed to the dangerous areas; The relatively safe areas of paddy field landscape changed from a centralized distribution to a divergent distribution, the safe areas transformed the relatively safe areas and hazardous areas. The ecological security of dry land and paddy field landscape was not optimistic. Thirdly, the gray analysis results indicated that the driving factors that affect the evolution of landscape ecological security and the transfer of gravity in dry land of the study area were obtained, and the maximum was the total agricultural output value, followed by grain yield and crop sown area. Grain yield was the most important factor affected by the evolution of landscape ecological security and gravity transfer in paddy fields, followed by the level of fertilizer application and population density.

Key Words: cultivated land; landscape ecological security; evolution; mountainous area of Karst

耕地作为维系地球生命平衡的必要组分,承载着粮食生产、生态服务、社会安定、景观美化等功能。随着我国近年来人口的剧增,地少人多、耕地后备资源不足、总体质量差、耕地退化严重、耕地资源贫乏、土地利用率低等问题日益突出,引起了各级政府和国内外广大学者的高度关注。对特定区域耕地景观生态安全进行研究,指导耕地保护,保障粮食安全刻不容缓。目前,对区域生态安全的分析主要包括动态预警[1-2]、安全格局构建[3]、评价与预测[4-6]等方面;在景观生态安全研究上常围绕生态风险评价[7]、生态修复与重建[8]、生态用地保护[9]展开;国外针对耕地景观生态安全的研究集中在农业景观监测及环境安全[10]、农业景观透视食品安全[11]、耕地景观生态恢复[12]、农业景观生态保护[13]方面;国内学者采用 3S 技术从不同坡度级角度对景观格局、演变驱动力、景观破碎化等方面进行了大量的实例研究[14-18],徐辉[19]、王千[20]、裴欢[21]、于潇[22]等则从耕地生态安全评价、时空分析、模拟预测等层面进行研究;对于喀斯特地区的耕地研究侧重于耕地质量[23]、耕地地力[24]、耕地占补平衡[25]层面,探讨喀斯特山区耕地景观生态安全及演变过程的研究较为薄弱。我国主要有 5 个脆弱生态区,其中贵州处于南方石灰岩山地脆弱生态区,是全国乃至全世界喀斯特漫衍面积最大、发育最完好的高原山区,独特的地质环境背景加上生存型经济发展阶段不合理的土地开发方式使该区域耕地生态环境遭到破坏,土壤侵蚀退化严重,人地关系矛盾十分尖锐[26],其景观生态安全格局变化及驱动机制研究亟待提升。

因此本文以贵州省县级市赤水市为研究区域,在景观生态学和人地关系协调理论基础上,借助 GIS、遥感软件及技术,针对喀斯特山区县域耕地景观生态安全格局演变问题开展研究,在耕地类型划分二级地类时,考虑到当前对耕地景观生态安全的研究少有将耕地细分做深入探析的,因而选择耕地的两大类型即旱地和水田

进行研究,着重分析 2000—2014 年间赤水市 17 个乡镇及街道旱地和水田景观分布的时空演化特征、景观生态安全状况、重心移动轨迹以及驱动因素,旨在深入认识耕地景观时空变化特征和耕地生态安全格局演变趋势,为我国喀斯特山区优化耕地资源结构布局、保护耕地生态系统、最大程度可持续利用耕地资源提供一定的科学依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

赤水市地处贵州省最西北部(105°36′—106°15′E, 28°16′—28°46′N),东西长 61.85km,南北宽 55.35km(图 1);辖 11 个镇 3 个乡 3 个街道,土地总面积 18.52 万 hm^2,总人口 31.01 万人。位于四川盆地向贵州高原过渡的斜坡地带,主要以高原峡谷型和山原峡谷型为主,地势跌宕起伏,海拔最高处 1730m,最低处 221m,具有“顶平、身陡、麓缓”坡面特征,该地区基岩主要以石英砂岩、泥页岩为主,水蚀沟蚀作用的影响较大,水土流失较严重。属中亚热带湿润季风气候,立体气候和地区差异显著,为长江水系,位于赤水河中下游,蓄水总量达 3000 万 m^3,河网密度达到 0.7km/km^2,水资源较为丰富。赤水境内土壤多为发育在侏罗系和白垩系的紫色砂岩和泥岩上的幼年性土壤[27]。据 2014 统计年鉴数据显示,赤水市粮食播种面积 3.27 万 hm^2、粮食总产量 13.81 万 t、人均粮食占有量 0.445t。

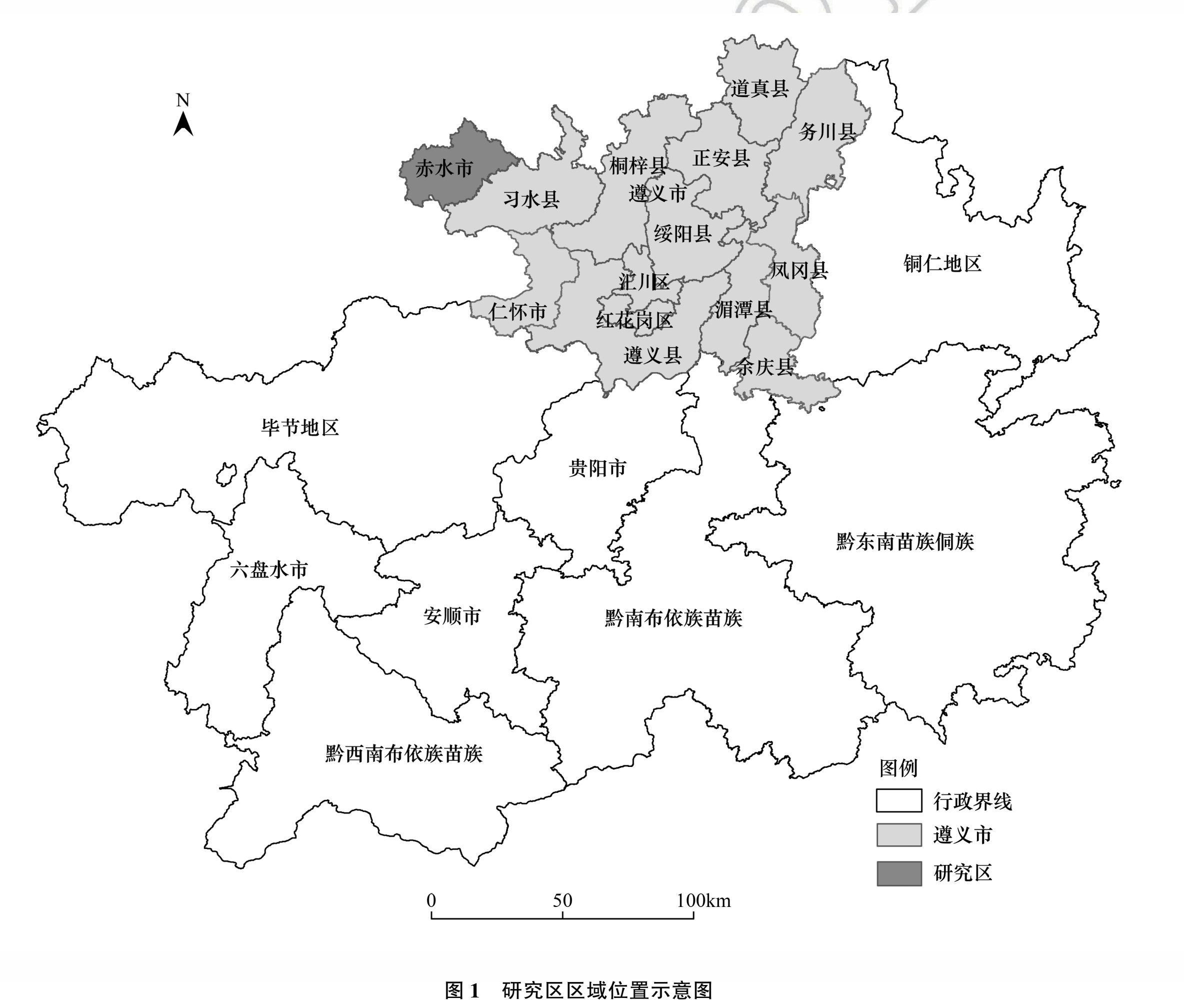


图 1 研究区区域位置示意图

Fig.1 Sketch map of location of study area

1.2 数据来源

本文选用 2000、2014 年土地利用现状图(比例尺 1:30 万)作为基础数据库,利用 ArcGIS 10.2 提取出赤水

市 2 个时期的耕地利用现状数据,包括赤水市各乡镇及街道的土地面积、旱地和水田的斑块数、斑块面积、斑块周长、斑块间距离等,以及各乡镇及街道旱地、水田的重心坐标,用于景观指标的测算、景观生态安全评价及重心转移的研究。

赤水市各乡镇及街道 2000 年和 2014 年的人口密度、农业人口比重、区域建设用地比例、粮食产量、单位耕地化肥施用量、耕地面积、农业总产值、农民人均可支配收入、农作物播种面积、农村从业人数等 10 个指标来源于 2000 年和 2014 年赤水市统计年鉴和国民经济和社会发展统计公报等统计资料,用于探索耕地景观演化及生态安全重心转移的驱动因素。

1.3　研究方法

1.3.1　耕地景观指标选取与分析方法

喀斯特山区土地斑块形状很复杂,加之坡耕地分布广泛,因此选取斑块密度(Patch Density,PD)、斑块形状指数(Patch Shape Index,PSI)、斑块分形维数(Patch Fractal Dimension,PFD)、稳定性系数(Patch Stability Factor,PSF)指标来分析喀斯特山区耕地景观斑块演化特征和景观格局空间配置特征。具体计算公式见钱凤魁[28]、王平、李婜、郄瑞卿等[29-31]文献。

1.3.2　景观生态安全评价模型

本文借鉴传统景观生态安全评价方法,引入生态质量指数构建喀斯特山区耕地景观生态安全评价模型[22],该模型能较好地反映景观结构与功能、生态系统的完整性、景观斑块动态与生态演替、系统对干扰的阻抗与恢复能力[32],是生态风险和生态健康的有机结合,其不受统计尺度的限制,能够充分体现景观生态安全的内涵,能相对真实地反映喀斯特山区县域景观生态系统的风险或安全状态。表达式为:

$$\mathrm{LSES}=1-[(\mathrm{PX}+\mathrm{PF}+\mathrm{PBF}+\mathrm{SHDI}+\mathrm{DIVISION})\times 2.5\mathrm{LFI}] \tag{1}$$

式中,LSES(Landscape Ecological Security Index)为景观生态安全指数,PX(Patch Proximity Index)为接近度指数,PF(Patch Fragmentation)为景观类型斑块破碎度,PBF(Patch Boundary Fragmentation)为景观类型边界破碎度,SHDI(Landscape Type Patch Dominance Index)为景观类型斑块优势度指数,DIVISION(Separation Index)为景观分离度指数,LFI(Landscape Fragile Index)为景观脆弱度指数。各景观指数计算公式见傅伯杰、高杨等[33-34]文献,计算过程主要借助 ArcGIS 10.2 中的 Spatial Analyst 工具及 Fragstats 4.2 软件平台进行。参考裴欢、魏勇[21]等人的研究成果,将结果分为 3 个等级区:Ⅰ级区(LSES≤0.45),Ⅱ级区(0.45<LSES≤0.75),Ⅲ级区(0.75<LSES≤1),其对应的生态安全状态为:Ⅰ级(危险)、Ⅱ级(相对安全)、Ⅲ级(安全)。

1.3.3　耕地景观生态安全重心移动

各种物质和能量在空间上的聚散和迁移,在某一时刻会出现一个重心,重心的运动方向、速度和强度是表征某一物质在空间上变化的最好指标[35-36]。耕地景观生态安全重心变化是研究其生态安全空间格局变化的一个重要方面,能够直观地反映耕地景观生态安全时空演变的过程和趋势,揭示其动态变化的特征及驱动机制。因此本文引入在地理学、经济学中常用的重心法来计算 2000 年和 2014 年研究区耕地景观生态安全重心,重心位置用经纬度来表示,表达式为:

$$X=\frac{\sum_{i=1}^{n}(\mathrm{LSES}_i\times X_i)}{\sum_{i=1}^{n}\mathrm{LSES}_i}\qquad Y=\frac{\sum_{i=1}^{n}(\mathrm{LSES}_i\times Y_i)}{\sum_{i=1}^{n}\mathrm{LSES}_i} \tag{2}$$

式中,X、Y 为研究区耕地景观生态安全重心坐标;LSES_i 为第 i 个研究区域单元的耕地景观生态安全指数;X_i、Y_i 分别表示第 i 个评价单元的重心坐标。

为了定量测度耕地景观生态安全重心转移距离和方向,引入重心转移距离模型和移动方向模型[37]:

设第 m、n 年的景观生态安全重心分别为 $P_m(X_m,Y_m)$,$P_n(X_n,Y_n)$,令 d_{n-m} 为 m 到 n 年重心转移的空间距离(km),m 为起始年,n 为终止年,c 为常数(c=111.11)表示由地球经纬坐标单位(°)转化为平面距离(km)的系数。则有:

$$d_{n-m} = c \times \sqrt{(X_n - X_m)^2 + (Y_n - Y_m)^2} \quad (3)$$

令 θ_{n-m} 为 m 到 n 年重心转移的角度($-180° \leqslant \theta \leqslant 180°$),正东方向为 0°,正南方向为-90°,正西方向为±180°,正北方向为 90°,顺时针旋转为负,逆时针旋转为正。通常情况下,当$-180°<\theta<-90°$说明重心向西南方向移动;当$-90°<\theta<0°$说明重心向东南方向移动;当$0°<\theta<90°$说明重心向东北方向移动;当$90°<\theta<180°$说明重心向西北方向移动,a=0,1,2。则有:

$$\theta_{n-m} = \frac{a\pi}{2} + \mathrm{arctg}\left(\frac{Y_n - Y_m}{X_n - X_m}\right) \quad (4)$$

1.3.4 驱动因素分析

耕地景观演化及生态安全重心转移驱动因素分析采用灰色关联分析方法,该方法通过灰色关联度来确定因素对系统主行为的贡献,其基本思想是根据序列几何形状的相似度来判断其联系是否紧密。它对样本量的多少和样本有无规律都同样适用,不会出现量化结果与定性分析结果不符的情况,因此本文引入此方法测算2000—2014 年耕地景观生态安全指数变化量与各驱动因素变化量间的关联度,并进行综合比较和排序,探寻研究区耕地景观生态安全演化过程原因及促发其重心转移的主要因素。灰色关联分析方法表达式为:

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\min\min|x_0(k) - x_i(k)| + \rho\max\max|x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho\max\max|x_0(k) - x_i(k)|} \quad (5)$$

$$r_i = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\varepsilon_i(k)$$

式中, $\varepsilon_i(k)$ 为子序列 X_i 的第 K 个元素与母序列 X_0 的第 K 个元素间的关联系数; r_i 为关联度。其中 ρ 为分辨系数,用来消弱 $\Delta(\max)$ 过大而使关联系数失真的影响,人为引入此系数来提高关联系数之间的差异显著性,通常 ρ 取 0.5,参数 min 与 max 的取值通过对各个比较序列不同时刻的绝对差值的比较来确定[38]。

指标的标准化处理:由于灰色关联分析系统各数列中数据量纲不同,不便于比较或难以得到正确的结论,为了保证结果的可靠性,在进行灰色关联度分析时,需先采用极差标准化法对数据进行无量纲处理,该方法对正向指标和逆向指标都适用,经过极差变换后,标准化指标值均在 0—1 之间[39]。

情况一:当样本表现为望大特性时,

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_{ij})}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} \quad (6)$$

情况二:当样本表现为望小特性时,

$$X'_{ij} = \frac{\max(X_{ij}) - X_{ij}}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} \quad (7)$$

式中, X_{ij} 为第 i 年第 j 个指标,即原始数据; X'_{ij} 为标准化值; $\max(X_{ij})$ 为 X_{ij} 中的最大值; $\min(X_{ij})$ 为 X_{ij} 中的最小值。

2 结果与分析

2.1 耕地景观斑块演化特征

由 2000、2014 年赤水市耕地景观的斑块密度和现状指数(表 1)可知,2000—2014 年赤水市旱地和水田面积大幅减少,斑块密度下降,斑块形状指数上升,旱地的斑块密度由 2000 年的 0.39 下降到 2014 年的 0.25,水田的斑块密度由 2000 年的 0.33 下降到 2014 年的 0.27,说明从 2000—2014 年,旱地和水田景观的破碎度在降低,空间分布越来越均匀。旱地的斑块形状指数由 2000 年的 0.06 上升到 2014 年的 0.09,水田的斑块形状指数由 2000 年的 0.05 上升到 2014 年的 0.08,且各时期旱地的斑块形状指数均大于水田,表明旱地和水田从2000—2014 年,斑块形状越来越复杂,但旱地比水田的复杂程度更深。在这 15 年间,耕地景观在空间上分布趋于均匀、形状趋于复杂状态。此外,2000 年的旱地斑块密度大于水田的斑块密度,说明旱地景观的破碎化

程度比水田景观严重;2014 年时虽然旱地和水田的斑块密度都在下降,但水田的斑块密度降幅比旱地的斑块密度降幅小,导致水田的斑块密度大于旱地的斑块密度,可知 14 年后水田景观的破碎程度比旱地景观的破碎程度更大,即旱地景观在空间分布上比水田景观更均匀。

表 1　研究区 2000、2014 年耕地景观特征指标变化

Table 1　Changes of cultivated land landscape characteristics in the study area in 2000 and 2014

土地利用类型 Land use types	景观特征指标 Landscape characteristic index	2000	2014
旱地 Dry land	斑块面积/hm^2	11211.33	8034.99
	斑块密度	0.39	0.25
	斑块形状指数	0.06	0.09
水田 Paddy field	斑块面积/hm^2	20280.58	16543.09
	斑块密度	0.33	0.27
	斑块形状指数	0.05	0.08

2.2　耕地景观空间配置特征

景观的空间构成要素有点、线、面和体,为了反映耕地景观要素的空间位置和形态特征,引入分形维数和稳定性系数对景观要素面积大小、周长及形状的空间进行研究。分形维数的大小与人类对景观的管理密切相关,从时间和空间的层面看,分形维数越大,耕地形态变得越复杂、越不规则,在空间上呈扩张态势;反之,耕地形态变得越简单、越规则,在空间上呈缩小态势[40]。

从研究区 2000 年、2014 年各乡镇及街道旱地与水田的分形维数(表 2)可看出,在时间尺度上,2000—2014 年赤水市各乡镇及街道耕地的分形维数在整体上都有所下降,但石堡乡旱地景观与两河口镇、宝源乡水田景观的分形维数有所上升,其耕地斑块形态愈来愈复杂,在空间上呈现无序的扩张趋势。在空间尺度上,2000 年大同镇、旺隆镇、官渡镇、长沙镇、天台镇的分形维数大于 1.45,这与以上乡镇是基本农田保护区所在地有关,其余乡镇的分形维数均小于 1.45,且乡镇间旱地与水田的分形维数跨度较大、不集中,而 2014 年除了宝源乡的分形维数大于 1.45 外,其余乡镇及街道的分形维数均小于 1.45,且乡镇间的分形维数跨度小、较为集中。

表 2　研究区 2000 年、2014 年各乡镇及街道耕地景观类型分形维数

Table 2　Fractal dimension of landscape types of cultivated land in various towns and streets in Chishui

研究区域 Study areas	2000		2014		研究区域 Study areas	2000		2014	
	旱地 Dry land	水田 Paddy field	旱地 Dry land	水田 Paddy field		旱地 Dry land	水田 Paddy field	旱地 Dry land	水田 Paddy field
复兴镇	1.43	1.42	1.25	1.29	天台镇	1.49	1.46	1.28	1.29
大同镇	1.43	1.45	1.24	1.30	丙安古镇	1.38	1.34	1.31	1.27
两河口镇	1.44	1.31	1.37	1.36	宝源乡	1.43	1.38	1.25	1.59
元厚镇	1.41	1.43	1.39	1.34	白云乡	1.36	1.36	1.10	1.15
葫市镇	1.44	1.43	1.37	1.38	石堡乡	1.22	1.34	1.23	1.31
旺隆镇	1.49	1.41	1.32	1.32	文华街道	1.38	1.34	1.18	1.15
官渡镇	1.49	1.45	1.35	1.38	市中街道	0.68	0.44	0.15	0.39
长期镇	1.45	1.45	1.34	1.33	金华街道	1.31	1.18	1.08	0.64
长沙镇	1.40	1.39	1.24	1.28					

2000—2014 年赤水市各乡镇耕地的空间结构稳定性指数整体呈上升趋势(表 3),但两河口镇、宝源乡、石堡乡例外,两河口镇和宝源乡水田的稳定性指数较 2000 年有所下降,石堡乡旱地的稳定性指数较 2000 年有所下降。整体来看,2000 年水田的稳定性指数大于旱地的稳定性指数,但 2014 年旱地的稳定性指数普遍大于水田的稳定性指数,说明水田空间稳定性随着时间的推移变得越来越不稳定,而旱地稳定性则逐渐增强。

表 3　研究区 2000 年、2014 年各乡镇及街道耕地稳定性指数

Table 3　Stability index of cultivated land in towns and streets in 2014 and 2000

研究区域 Study areas	2000		2014		研究区域 Study areas	2000		2014	
	旱地 Dry land	水田 Paddy field	旱地 Dry land	水田 Paddy field		旱地 Dry land	水田 Paddy field	旱地 Dry land	水田 Paddy field
复兴镇	0.07	0.08	0.25	0.21	天台镇	0.01	0.04	0.22	0.21
大同镇	0.07	0.05	0.26	0.20	丙安古镇	0.12	0.16	0.19	0.23
两河口镇	0.06	0.19	0.13	0.14	宝源乡	0.08	0.12	0.25	0.09
元厚镇	0.10	0.07	0.11	0.16	白云乡	0.14	0.14	0.40	0.36
葫市镇	0.06	0.07	0.13	0.13	石堡乡	0.28	0.16	0.27	0.19
旺隆镇	0.01	0.10	0.18	0.18	文华街道	0.13	0.16	0.32	0.35
官渡镇	0.01	0.05	0.15	0.12	市中街道	0.82	1.06	1.36	1.11
长期镇	0.05	0.05	0.17	0.18	金华街道	0.19	0.32	0.42	0.86
长沙镇	0.10	0.11	0.26	0.22					

2.3　耕地景观生态安全状况

赤水市耕地景观格局指数整体呈现下降趋势(表 4、表 5),2000 年研究区旱地景观平均生态安全指数为 0.767,2014 年下降到 0.695,水田景观平均生态安全指数由 2000 年的 0.822 下降到 2014 年的 0.743,表明研究区旱地和水田景观生态安全性持续下降。

表 4　2000 年研究区各乡镇及街道耕地景观格局指数

Table 4　Landscape pattern index of cultivated land in different towns and streets in the study area in 2000

研究区域 Study areas	旱地 Dry land							水田 Paddy field						
	接近度 PX	斑块破碎度 PF	边界破碎度 PBF	斑块优势度 SHDI	分离度 DIVISION	脆弱度 LFI	生态安全指数 LSES	接近度 PX	斑块破碎度 PF	边界破碎度 PBF	斑块优势度 SHDI	分离度 DIVISION	脆弱度 LFI	生态安全指数 LSES
复兴镇	0.062	0.086	0.054	0.091	0.053	0.335	0.711	0.046	0.036	0.071	0.061	0.034	0.291	0.819
大同镇	0.049	0.083	0.034	0.159	0.096	0.207	0.782	0.049	0.060	0.081	0.055	0.032	0.340	0.765
两河口镇	0.032	0.065	0.019	0.217	0.188	0.170	0.779	0.035	0.033	0.027	0.197	0.102	0.174	0.829
元厚镇	0.073	0.072	0.027	0.155	0.092	0.397	0.585	0.089	0.044	0.048	0.108	0.048	0.423	0.644
葫市镇	0.073	0.085	0.023	0.188	0.130	0.350	0.563	0.053	0.040	0.029	0.180	0.087	0.290	0.718
旺隆镇	0.122	0.129	0.091	0.025	0.032	0.408	0.394	0.037	0.033	0.055	0.095	0.043	0.252	0.834
官渡镇	0.035	0.075	0.014	0.241	0.277	0.140	0.774	0.106	0.043	0.048	0.117	0.051	0.423	0.614
长期镇	0.056	0.097	0.049	0.113	0.063	0.322	0.695	0.115	0.047	0.099	0.017	0.024	0.475	0.643
长沙镇	0.045	0.063	0.042	0.125	0.070	0.224	0.807	0.062	0.031	0.071	0.049	0.031	0.281	0.829
天台镇	0.079	0.131	0.082	0.053	0.040	0.445	0.572	0.049	0.053	0.085	0.055	0.032	0.306	0.791
丙安古镇	0.038	0.053	0.030	0.149	0.086	0.260	0.768	0.026	0.020	0.028	0.169	0.078	0.159	0.872
宝源乡	0.013	0.048	0.023	0.220	0.197	0.064	0.919	0.031	0.029	0.056	0.103	0.046	0.153	0.899
白云乡	0.046	0.040	0.063	0.059	0.041	0.213	0.867	0.025	0.021	0.080	0.042	0.029	0.168	0.917
石堡乡	0.008	0.012	0.009	0.246	0.305	0.054	0.921	0.115	0.013	0.033	0.156	0.070	0.131	0.873
文华街道	0.029	0.031	0.117	0.001	0.027	0.135	0.931	0.015	0.009	0.125	0.001	0.020	0.098	0.958
市中街道	0.001	0.001	0.038	0.096	0.055	0.011	0.995	0.001	0.001	0.001	0.341	8.858	0.001	0.977
金华街道	0.010	0.018	0.101	0.027	0.033	0.064	0.970	0.004	0.004	0.073	0.058	0.033	0.035	0.985
平均值 Average value	0.045	0.064	0.048	0.127	0.105	0.224	0.767	0.050	0.030	0.059	0.106	0.566	0.235	0.822

PX: Patch Proximity Index; PF: Patch Fragmentation; PBF: Patch Boundary Fragmentation; SHDI: Landscape Type Patch Dominance Index; DIVISION: Separation Index; LFI: Landscape Fragile Index; LSES: Landscape Ecological Security Index

随着城镇化的发展,人类对耕地的干扰力度加大,耕地连接度指数在不断上升(表 4、表 5),旱地连接度

指数从 2000 年的 0.045 上升为 2014 的 0.314,水田连接度指数从 2000 年的 0.050 上升为 2014 年的 0.164,旱地和水田斑块变得越来越群聚;由于破碎度指数减小,斑块形状也愈加规则;旱地的脆弱度指数从 2000 年的 0.224 增加到 2014 的 0.235,整体脆弱性增加,旱地的管理难度在逐渐加大。而水田的脆弱度指数从 2000 年的 0.235 下降到 0.228,脆弱性降低,水田景观抵抗干扰能力变得越来越强。

表 5　2014 年研究区各乡镇及街道耕地景观格局指数

Table 5　Landscape pattern index of cultivated land in different towns and streets in the study area in 2014

研究区域 Study areas	旱地 Dry land							水田 Paddy field						
	接近度 PX	斑块破碎度 PF	边界破碎度 PBF	斑块优势度 SHDI	分离度 DIVISION	脆弱度 LFI	生态安全指数 LSES	接近度 PX	斑块破碎度 PF	边界破碎度 PBF	斑块优势度 SHDI	分离度 DIVISION	脆弱度 LFI	生态安全指数 LSES
复兴镇	0.207	0.035	0.019	0.094	0.109	0.228	0.736	0.371	0.020	0.045	0.040	0.033	0.359	0.543
大同镇	0.109	0.039	0.021	0.063	0.080	0.343	0.732	0.085	0.022	0.055	0.000	0.025	0.545	0.747
两河口镇	2.120	0.088	0.022	0.096	0.112	0.399	0.484	0.050	0.034	0.016	0.217	0.164	0.132	0.841
元厚镇	0.247	0.122	0.027	0.068	0.084	0.604	0.172	0.164	0.049	0.035	0.080	0.045	0.547	0.490
葫市镇	0.412	0.092	0.014	0.140	0.191	0.333	0.294	0.988	0.053	0.019	0.188	0.115	0.267	0.089
旺隆镇	0.046	0.058	0.015	0.142	0.197	0.139	0.841	0.581	0.033	0.050	0.031	0.031	0.423	0.231
官渡镇	0.364	0.075	0.024	0.062	0.080	0.681	0.187	0.373	0.050	0.024	0.168	0.095	0.279	0.505
长期镇	0.078	0.065	0.019	0.116	0.139	0.205	0.786	0.023	0.032	0.034	0.109	0.056	0.245	0.844
长沙镇	0.038	0.033	0.015	0.122	0.150	0.145	0.870	0.048	0.023	0.037	0.080	0.045	0.234	0.863
天台镇	1.403	0.028	0.020	0.096	0.111	0.224	0.321	0.049	0.018	0.047	0.029	0.031	0.389	0.831
丙安古镇	0.098	0.053	0.015	0.132	0.169	0.185	0.784	0.021	0.025	0.019	0.173	0.099	0.153	0.871
宝源乡	0.024	0.033	0.014	0.143	0.198	0.089	0.908	0.003	0.016	0.035	0.230	0.196	0.044	0.947
白云乡	0.014	0.014	0.011	0.148	0.213	0.058	0.942	0.024	0.009	0.027	0.101	0.053	0.113	0.939
石堡乡	0.090	0.023	0.018	0.093	0.107	0.215	0.822	0.010	0.016	0.018	0.211	0.150	0.074	0.925
文华街道	0.072	0.007	0.045	0.000	0.048	0.105	0.955	0.003	0.003	0.036	0.126	0.065	0.038	0.978
市中街道	0.001	0.001	0.014	0.111	0.131	0.006	0.996	0.001	0.001	0.018	0.238	0.219	0.002	0.998
金华街道	0.011	0.005	0.039	0.038	0.065	0.045	0.982	0.002	0.001	0.015	0.101	0.053	0.027	0.988
平均值 Average value	0.314	0.045	0.021	0.098	0.129	0.235	0.695	0.164	0.024	0.031	0.125	0.087	0.228	0.743

通过对计算结果进行分级,得出耕地景观生态安全分区图(图 2),可看出赤水市 17 个乡镇及街道耕地景观安全状况差异特征显著:2000 年时旱地景观生态安全Ⅰ级(危险)区位于赤水北部的旺隆镇,Ⅱ级(相对安全)区主要位于东南部地区的长期镇、葫市镇、元厚镇,Ⅲ级(安全)区主要位于西部地区的文华办、市中办、金华办、大同镇、宝源乡、两河口镇、丙安古镇;2014 年旱地景观Ⅰ级区范围增加了天台镇、葫市镇、元厚镇、官渡镇,主要分布在赤水东部地区,Ⅱ级区较 2000 年变为了大同镇、复兴镇、两河口镇,Ⅲ级区移动到了中部,包括丙安古镇、旺隆镇、白云乡、长沙镇、长期镇。水田景观生态安全状况在 2000 年只有 2 个分区,且分布较为集中,Ⅱ级区位于赤水东部,包括长期镇、官渡镇、葫市镇、元厚镇 4 个乡镇,其余的 13 个乡镇及街道都属于Ⅲ级区;但到 2014 年时水田景观生态安全状况为 3 个分区,Ⅰ级区为旺隆镇和葫市镇,Ⅱ级区分布较为分散,主要包括官渡镇、元厚镇、大同镇、复兴镇,Ⅲ级区在 2000 年的基础上减少了旺隆镇、复兴镇、大同镇,增加了长期镇。

因此,2000—2014 年赤水市各乡镇及街道旱地、水田景观生态安全格局变化的主要特征为:危险区格局变化较为显著,其范围由中部地区向东南部地区扩张,由相对安全区转变而来;相对安全区格局变化较为分散,主要表现为安全区向相对安全区过渡;安全区的规模不断压缩,由西南部地区向东南部地区减少,向东北部推进。

2.4　耕地景观生态安全重心移动

由旱地、水田景观生态安全重心坐标生成的重心转移图(图 3)得其重心转移特征(表 6),2000—2014 年赤水

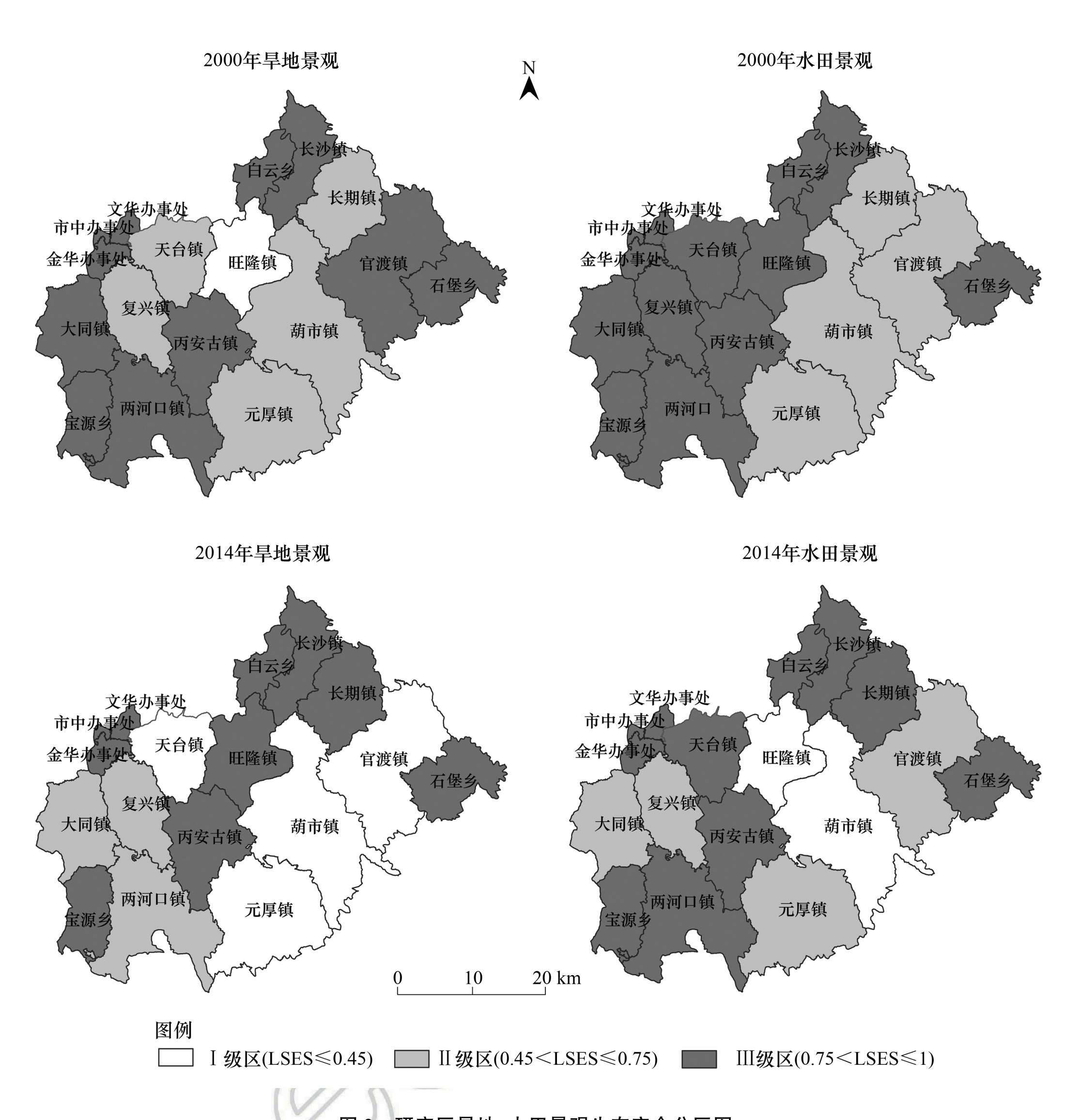


图 2 研究区旱地、水田景观生态安全分区图

Fig.2 Grading map of ecological security of dry land and paddy field in study area

LSES：景观生态安全指数 Landscape Ecological Security Index

市旱地和水田的景观生态安全重心都向着西北方向转移，但旱地景观生态安全重心的经纬度变化幅度比水田的重心变化幅度大，旱地景观生态安全重心移动距离明显比水田景观生态重心移动距离大。2000—2014 年旱地景观生态重心向西北方向移动了 219.335km，由旺隆镇的新春村以 129.341°朝向移动到天台镇的三块村；水田景观生态重心向西北方向移动了 94.124km，在旺隆镇新春村界内以 135.096°朝向进行移动。

表 6 重心转移特征

Table 6 The characteristic of barycenter diversion in the study area during 2000 to 2014

地类 Land type	经度变化 Variation of longitude	纬度变化 Variation of latitude	移动角度 Mobile angle	移动方向 Direction of motion	移动距离 Movement distance
旱地 Dry land	1.527	−1.251	129.341	西北方	219.335
水田 Paddy field	0.598	−0.600	135.096	西北方	94.124

2.5 驱动因素分析

近 15 年来赤水市耕地景观的变化受到自然、经济、人口、政治、文化、生产技术等因素的影响，为探寻影响耕地景观变化及重心转移的主要驱动因子，考虑到内部自然驱动和外部人为干扰因素对耕地景观生态安全格

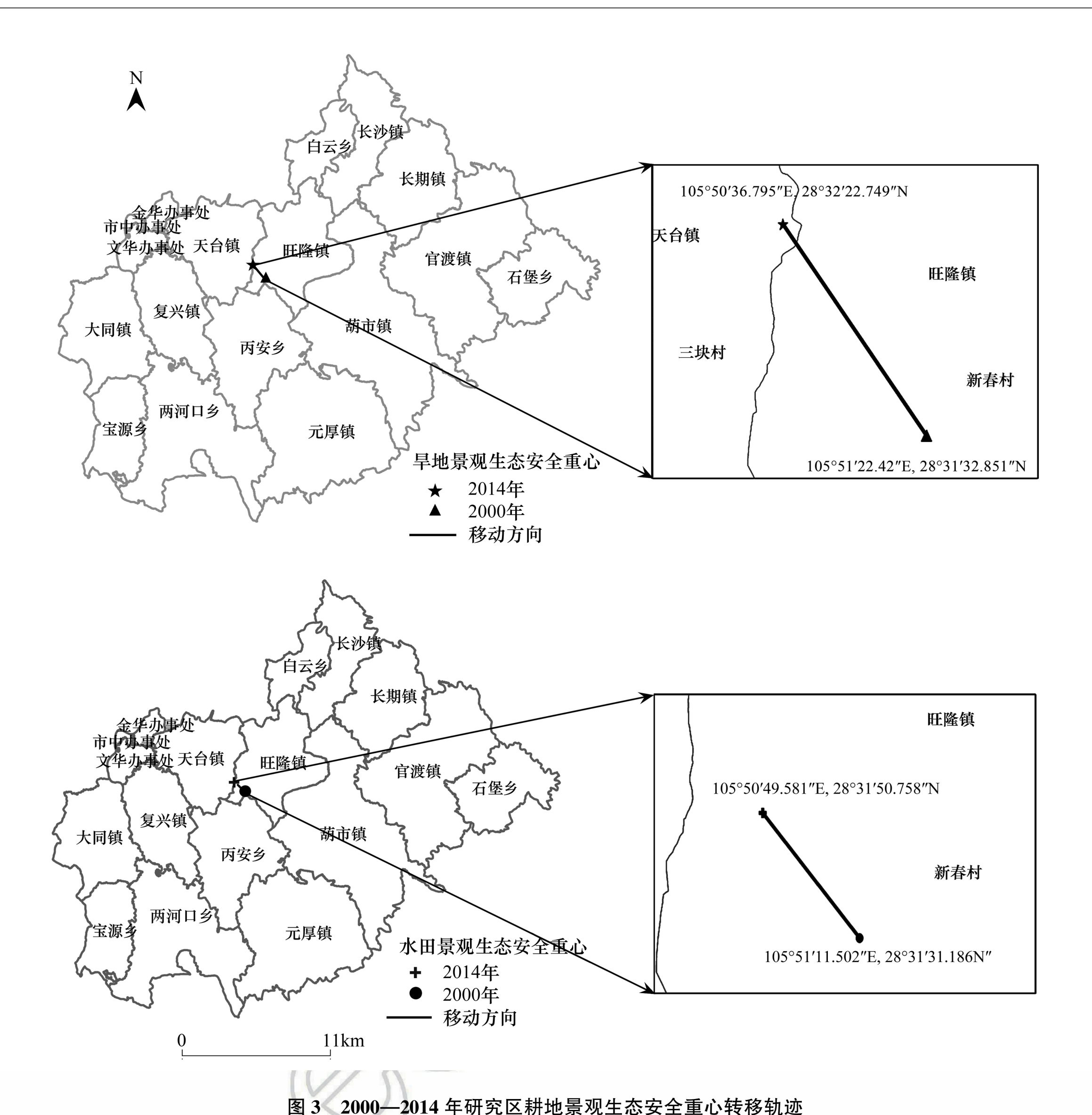


图 3　2000—2014 年研究区耕地景观生态安全重心转移轨迹

Fig.3　Gravity center transferring map of landscape ecological security in study area during 2000 to 2014

局的影响作用,在搜集和查阅国内外相关研究的基础上,依照科学性、系统性、代表性、可获取性和可度量性原则,结合研究区域的地域特征,从赤水市统计年鉴和国民经济和社会发展统计公报等统计资料中,选取人口密度(X_1)、农业人口比重(X_2)、区域建设用地比例(X_3)、粮食产量(X_4)、单位耕地化肥施用量(X_5)、耕地面积(X_6)、农业总产值(X_7)、农民人均可支配收入(X_8)、农作物播种面积(X_9)、农村从业人数(X_{10})共 10 个指标,与耕地景观生态安全指数变化进行灰色关联分析,探索耕地景观演化及生态安全重心转移的驱动因素。

将 2000 年和 2014 年各个乡镇及街道 10 个统计指标的变化数据作为比较序列(表 7);将 2000 年和 2014 年研究区耕地景观生态安全指数变化量作为系统行为特征的参考序列,通过计算灰色关联系数,得到赤水市耕地景观生态安全指数变化与驱动因子之间的关联系数矩阵(表 8、表 9),在此基础上对关联系数序列进行从大到小排序,依此确定各土地利用类型的主要驱动因素。

研究区 2000—2014 年旱地景观生态安全演变及重心转移的关联系数大小排序(表 8)为:农业总产值(2.111)>粮食产量(2.096)>农作物播种面积(2.048)>农业人口比重(1.990)>耕地面积(1.933)>农村从业人数(1.884)>农民人均可支配收入(1.878)>区域建设用地比例(1.740)>单位耕地化肥施用量(1.614)>人口密度(1.604)。

表 7 2000—2014 年赤水市各乡镇及街道统计指标变化量

Table 7 Statistics on the Change of Statistical Indicators of Township and Street Offices in Chishui from 2000 to 2014

研究区域 Study areas	人口密度 Population density/ (人/km^2)	农业人口比重 Proportion of agricultural population/%	区域建设用地比例 Rate of regional construction land/%	粮食产量 Grain yield/kg	单位耕地化肥施用量 Unit of cultivated land fertilizer/ (kg/hm^2)	耕地面积 Arable area/hm^2	农业总产值 Gross output value of agriculture/万元	农民人均可支配收入 Per capita disposable income of farmers/元	农作物播种面积 Crop sown area/hm^2	农村从业人数 Number of rural practitioners/人
复兴镇	3.706	0.462	-0.018	1455000	-4630	209.210	15799	6702	636.700	2375
大同镇	3.797	0.568	-0.031	-2083000	-4600	-86.820	15539	7775	941.600	-442
两河口镇	3.444	-3.977	0.061	172000	-4500	-9.000	7766	6448	162.700	1470
元厚镇	0.808	1.761	0.000	-285000	-4430	-80.000	11994	7547	763.500	2390
葫市镇	2.692	1.535	0.031	-722000	-4590	-87.020	14776	6608	216.000	1403
旺隆镇	9.799	-0.895	-0.067	-901000	-4440	-212.400	18158	6536	381.600	179
官渡镇	7.731	-0.357	-0.002	2497000	-4460	-211.050	25998	8181	-47.700	2335
长期镇	15.284	-1.303	0.470	2281000	-4310	-59.770	18471	8078	881.200	3696
长沙镇	13.771	-0.131	0.109	2546000	-4620	-21.480	16692	7181	1204.100	786
天台镇	-0.573	-1.243	0.118	2158000	-4680	698.880	14821	8701	969.500	-858
丙安古镇	1.112	1.654	0.015	838000	-4360	-11.000	9520	6515	309.400	229
宝源乡	8.479	-2.726	0.050	49000	-4740	-84.830	8455	6408	404.100	-250
白云乡	15.959	-1.755	0.006	886000	-4540	40.730	8917	7421	390.800	2423
石堡乡	13.300	-1.334	0.014	146000	-4330	56.620	8940	7253	177.300	216
文华街道	45.082	3.439	-0.560	-706000	-4450	866.080	4902	7980	650.300	1283
市中街道	2145.401	-0.648	-4.197	0	0	-13.000	582.5	9651	7.700	660
金华街道	-69.348	6.728	-0.320	-435000	-4650	361.610	2693	8446	-0.700	377

表 8 2000—2014 年研究区旱地景观各比较序列与参考序列间的关联系数表

Table 8 Correlation coefficients between the comparison and reference sequences of dry land during 2000 to 2014

研究区域 Study areas	$\varepsilon_1(k)$	$\varepsilon_2(k)$	$\varepsilon_3(k)$	$\varepsilon_4(k)$	$\varepsilon_5(k)$	$\varepsilon_6(k)$	$\varepsilon_7(k)$	$\varepsilon_8(k)$	$\varepsilon_9(k)$	$\varepsilon_{10}(k)$
复兴镇	1.714	2.215	1.519	2.231	1.695	2.140	2.960	1.498	2.752	2.427
大同镇	1.583	2.522	1.645	1.472	1.577	1.661	2.636	2.509	1.946	1.616
两河口镇	1.266	1.917	2.159	2.128	1.285	2.526	2.999	1.948	2.442	2.058
元厚镇	1.154	1.729	2.643	2.083	1.185	2.750	1.921	2.196	1.531	1.435
葫市镇	1.293	2.121	2.103	2.921	1.292	2.170	1.998	2.011	2.513	2.177
旺隆镇	2.800	1.237	1.083	1.205	2.663	1.000	1.855	1.027	1.296	1.179
官渡镇	1.024	1.790	2.496	1.007	1.041	2.993	1.000	1.433	3.000	1.249
长期镇	1.861	1.656	1.298	1.906	1.991	1.479	2.737	2.341	2.558	1.777
长沙镇	1.799	1.950	1.427	1.721	1.773	1.576	2.969	1.685	1.721	1.954
天台镇	1.311	2.633	2.001	1.375	1.290	1.471	2.040	1.700	1.519	1.818
丙安古镇	1.695	2.692	1.522	2.738	1.793	1.673	2.051	1.428	1.880	1.776
宝源乡	1.652	1.595	1.551	2.515	1.591	1.598	2.007	1.419	2.155	1.624
白云乡	1.826	1.608	1.441	2.993	1.835	1.657	1.847	1.812	1.899	2.585
石堡乡	1.514	2.069	1.716	2.944	1.593	2.076	2.332	2.109	1.893	2.038
文华街道	1.749	2.492	1.724	1.891	1.769	1.650	1.629	2.475	2.813	2.416
市中街道	1.404	1.980	1.611	2.425	1.404	1.697	1.404	1.611	1.464	2.040
金华街道	1.629	1.629	1.648	2.074	1.664	2.742	1.506	2.732	1.440	1.856

$\varepsilon_1(k)$、$\varepsilon_2(k)$、$\varepsilon_3(k)$、$\varepsilon_4(k)$、$\varepsilon_5(k)$、$\varepsilon_6(k)$、$\varepsilon_7(k)$、$\varepsilon_8(k)$、$\varepsilon_9(k)$、$\varepsilon_{10}(k)$ 分别表示人口密度变化量、农业人口比重变化量、区域建设用地比例变化量、粮食产量变化量、单位耕地化肥施用量变化量、耕地面积变化量、农业总产值变化量、农民人均可支配收入变化量、农作物播种面积变化量、农村从业人数变化量与各乡镇及街道旱地景观生态安全指数变化量间的关联系数

研究区 2000—2014 年水田景观生态安全演变及重心转移的关联系数大小排序(表 9)为:粮食产量(1.920)>单位耕地化肥施用量(1.903)>人口密度(1.895)>农民人均可支配收入(1.855)>农作物播种面积(1.842)>农村从业人数(1.801)>农业人口比重(1.759)>耕地面积(1.723)>农业总产值(1.673)>区域建设用地比例(1.489)。

表 9 2000—2014 年研究区水田景观各比较序列与参考序列间的关联系数表

Table 9 Correlation coefficients between the comparison and reference sequences of paddy field during 2000 to 2014

研究区域 Study areas	$\varepsilon_1(k)$	$\varepsilon_2(k)$	$\varepsilon_3(k)$	$\varepsilon_4(k)$	$\varepsilon_5(k)$	$\varepsilon_6(k)$	$\varepsilon_7(k)$	$\varepsilon_8(k)$	$\varepsilon_9(k)$	$\varepsilon_{10}(k)$
复兴镇	1.409	2.875	1.789	1.750	1.396	2.747	2.180	1.759	2.362	1.871
大同镇	2.009	1.809	1.301	1.188	1.999	1.311	2.267	1.802	2.649	1.282
两河口镇	2.113	1.154	1.239	1.870	2.168	1.355	1.483	1.165	1.329	1.929
元厚镇	1.638	2.737	1.511	2.147	1.702	1.546	2.355	2.036	2.550	2.290
葫市镇	1.000	1.446	2.471	1.849	1.000	2.382	1.387	2.614	2.066	1.473
旺隆镇	1.024	1.940	2.515	2.028	1.045	2.763	1.265	2.889	1.809	2.108
官渡镇	1.750	1.862	1.432	1.701	1.803	1.305	1.681	2.532	1.303	2.555
长期镇	2.728	1.174	0.979	2.634	2.485	1.081	1.844	1.490	1.937	2.936
长沙镇	2.212	1.563	1.202	2.094	2.172	1.309	2.208	1.384	2.094	1.565
天台镇	2.214	1.397	1.193	2.406	2.155	2.724	1.968	2.451	2.898	1.124
丙安古镇	2.063	2.009	1.266	2.347	2.213	1.372	1.622	1.200	1.511	1.442
宝源乡	2.261	1.225	1.198	1.717	2.145	1.226	1.459	1.116	1.538	1.242
白云乡	2.168	1.363	1.239	2.283	2.180	1.399	1.535	1.510	1.572	2.603
石堡乡	2.286	1.367	1.201	1.750	2.475	1.371	1.480	1.385	1.287	1.353
文华街道	2.203	2.492	1.383	1.491	2.235	2.044	1.320	1.841	2.027	1.808
市中街道	1.144	1.510	2.048	1.762	1.144	1.337	1.144	2.048	1.185	1.546
金华街道	1.988	1.988	1.344	1.621	2.040	2.013	1.246	2.319	1.199	1.482

$\varepsilon_1(k)$、$\varepsilon_2(k)$、$\varepsilon_3(k)$、$\varepsilon_4(k)$、$\varepsilon_5(k)$、$\varepsilon_6(k)$、$\varepsilon_7(k)$、$\varepsilon_8(k)$、$\varepsilon_9(k)$、$\varepsilon_{10}(k)$分别表示 10 个指标变化量与各乡镇及街道水田景观生态安全指数变化量间的关联系数

在系统发展过程中,若两个因素变化的态势具有一致性,即同步变化程度较高,则二者关联程度较高[41-42]。从表 7 统计指标 15 年变化量和表 8、表 9 关联度排序结果可看出,在旱地景观生态安全状况上,2000—2014 年间官渡镇由安全态变为危险态、长期镇由相对安全态变为安全态、旺隆镇由危险态变为安全态,三者的农业生产总值变化量分别为 25998 万元、18471 万元、18158 万元,变化量排一至三位,较其他地区大;官渡镇、长期镇粮食产量变化量分别为 2497000、2281000kg,变化量排第二、第三;天台镇由相对安全态变为危险态,大同镇由安全态变为相对安全态,其农作物播种面积变化量分别为 969.5、941.6hm^2,变化量排第二、第三。在水田景观生态安全上,15 年间长期镇由相对安全态变为安全态,大同镇有安全态变为相对安全态,二者的粮食产量变化量分别为 2281000、-2083000kg;复兴镇由安全态变为相对安全态,葫市镇由相对安全态变为危险态,其单位化肥施用量变化量分别为-4630、-4590kg/hm^2;旺隆镇由安全态变为危险态,其人口密度变化量为 9.799 人/km^2。上述结果说明,采用灰色关联法得出旱地景观生态安全演变及重心转移影响因素最大的是农业总产值,其次是粮食产量和农作物播种面积,水田景观生态安全演变及重心转移影响因素最大的是粮食产量,其次是单位化肥施用量和人口密度,符合研究区实际。

3 结论与讨论

本文以土地利用现状数据、统计数据为基础,选取景观、社会经济等一系列指标,借助 ArcGIS 10.2、Fragstats 4.2、SPSS 19.0 软件平台,在详细探讨近 15 年喀斯特山区县域耕地景观生态安全演变过程的基础上,进一步分析耕地景观生态安全演变方向及重心转移的驱动因素,可得到如下结论:

(1)在耕地景观斑块演化和空间配置特征方面,研究区15年间旱地和水田斑块密度下降,斑块形状指数上升,破碎度降低,空间分布逐渐均匀,但其斑块形状却越来越不规则。各乡镇及街道耕地的分形维数在整体上都有所下降,2000年各乡镇间旱地与水田的分形维数跨度较大、不集中,2014年各乡镇间的分形维数跨度小、较为集中。15年间各乡镇耕地的空间结构稳定性指数整体呈上升趋势,2014年时旱地的稳定性指数普遍大于水田的稳定性指数。

(2)在耕地景观生态安全状况上,研究区旱地和水田景观生态安全性不断降低。空间上,15年间旱地景观生态安全Ⅰ级(危险)区向东南部地区扩张,Ⅲ级(安全)区向Ⅱ级(相对安全)区转变,Ⅱ级区向Ⅰ级区转变;水田景观生态安全Ⅱ级区由集中向发散分布,Ⅲ级区向Ⅱ级区、Ⅰ级区转变。数量上,旱地景观从1个危险态、5个相对安全态、11个安全态变为了4个危险态、3个相对安全态、10个安全态;水田景观从0个危险态、4个相对安全态、13个安全态变为2个危险态、4个相对安全态、11个安全态,旱地和水田景观的生态安全不容乐观,危险区规模不断扩大,安全区规模不断缩小。旱地和水田的景观生态安全重心都向西北方向移动。

(3)通过灰色关联分析方法,得出影响研究区旱地和水田景观生态安全演变及重心转移的驱动因素不一致,旱地影响最大是农业总产值,其次是粮食产量和农作物播种面积;水田影响最大是粮食产量,其次是单位化肥施用量和人口密度。

本文以耕地景观生态安全评价模型、生态安全重心转移来考量喀斯特山区县域耕地景观生态安全,能够较全面地反映县域耕地景观的时空布局特征和生态演化方向;利用灰色关联法分析演变驱动因素,深入揭示了耕地景观生态安全演变机制;其结果符合研究区实际,采用此类方法研究喀斯特山区县域耕地景观生态安全是可行的。但由于受数据可获取性的影响,基础数据库比例过小,驱动因素指标等不够全面,今后需在大比例尺、高精度方面加强研究。

参考文献(References):

[1] 赵宏波, 马延吉. 基于变权-物元分析模型的老工业基地区域生态安全动态预警研究——以吉林省为例. 生态学报, 2014, 34(16): 4720-4733.

[2] 宫继萍, 石培基, 魏伟. 基于BP人工神经网络的区域生态安全预警——以甘肃省为例. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 211-216, 223-223.

[3] 龙涛, 刘学录, 黄万状. 基于系统耦合的区域生态安全格局构建——以酒泉市肃州区为例. 中国农学通报, 2015, 31(5): 132-138.

[4] 邵佳, 冷志明. 武陵山片区区域生态安全测度与评价. 经济地理, 2016, 36(10): 166-171.

[5] 王雪, 杨庆媛, 何春燕, 侯培. 基于P-S-R模型的生态涵养发展型区域土地生态安全评价——以重庆市丰都县为例. 水土保持研究, 2014, 21(3): 169-175.

[6] 欧定华, 夏建国, 欧晓芳. 基于GIS和RBF的城郊区生态安全评价及变化趋势预测——以成都市龙泉驿区为例. 地理与地理信息科学, 2017, 33(1): 49-58.

[7] 潘竟虎, 刘晓. 疏勒河流域景观生态风险评价与生态安全格局优化构建. 生态学杂志, 2016, 35(3): 791-799.

[8] 许申来, 李王锋, 陈振华, 陈珊珊. 基于生态安全的北京房山山区多目标生态修复与重建. 中国土地科学, 2011, 25(10): 82-88.

[9] 闫玉玉, 曹宇, 谭永忠. 基于景观安全格局的县域生态用地保护研究——以浙江省青田县为例. 中国土地科学, 2016, 30(11): 78-85.

[10] Fjellstad W, Dramstad W. Landscape monitoring as a tool in improving environmental security // Petrosillo I, Müller F, Jones K B, Zurlini G, Krauze K, Victorov S, Li B L, Kepner W G, eds. Use of Landscape Sciences for the Assessment of Environmental Security. Dordrecht: Springer, 2008: 131-141.

[11] Gartaula H, Patel K, Johnson D, Devkota R, Khadka K, Chaudhary P. From food security to food wellbeing: examining food security through the lens of food wellbeing in Nepal's rapidly changing agrarian landscape. Agriculture and Human Values, 2016, doi: 10.1007/s10460-016-9740-1.

[12] Jeffery L R. Ecological restoration in a cultural landscape: conservationist and Chagossian approaches to controlling the 'coconut chaos' on the Chagos Archipelago. Human Ecology, 2014, 42(6): 999-1006.

[13] Liu Y H, Zhao G S, Yu Z R. Developing integrated methods for biological conservation and sustainable production in agricultural landscapes // Hong S K, Bogaert J, Min Q W, eds. Biocultural Landscapes. Netherlands: Springer, 2014: 45-67.

[14] 杨斌, 王金生. 基于GIS的丘陵区耕地景观格局时空演变特征分析. 测绘工程, 2014, 23(9): 1-4, 8-8.

[15] 刘晓娜, 李宪海, 孙丹峰, 李红, 张微微, 周连第. SPOT5遥感影像城郊耕地景观提取与廊道立地分析. 农业工程学报, 2011, 27(4):

317-323.
[16] 王成, 袁敏, 魏朝富, 李阳兵, 蒋伟. 浅丘带坝区不同坡度下耕地景观格局分析. 生态学杂志, 2007, 26(9): 1424-1431.
[17] 潘涛. 水田扩张中三江平原北部耕地景观演化规律及驱动因素分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
[18] 台晓丽, 肖武, 张建勇, 吕雪娇, 丁晴. 基于景观指数的巢湖流域各县区耕地细碎化研究. 水土保持研究, 2016, 23(4): 94-98.
[19] 徐辉, 雷国平, 崔登攀, 赵宏波. 耕地生态安全评价研究——以黑龙江省宁安市为例. 水土保持研究, 2011, 18(6): 180-184, 189-189.
[20] 王千, 金晓斌, 周寅康. 河北省耕地生态安全及空间聚集格局. 农业工程学报, 2011, 27(8): 338-344.
[21] 裴欢, 魏勇, 王晓妍, 覃志豪, 侯春良. 耕地景观生态安全评价方法及其应用. 农业工程学报, 2014, 30(9): 212-219.
[22] 于潇, 吴克宁, 郧文聚, 魏洪斌, 刘玲, 宋英赫, 高星. 三江平原现代农业区景观生态安全时空分异分析. 农业工程学报, 2016, 32(8): 253-259.
[23] 韩会庆, 蔡广鹏, 张凤太, 郜红娟, 朱建. 基于GIS的喀斯特地区耕地质量评价——以贵州省绥阳县为例. 水土保持研究, 2011, 18(6): 129-131, 135-135.
[24] 赵亮, 韦学成, 黄国椅, 蒙凌璘, 朱利泉. 喀斯特地貌区耕地地力评价与分级. 农业工程学报, 2013, 29(8): 232-241.
[25] 何腾兵, 金蕾, 邓冬冬. 喀斯特山区县域耕地占补平衡预警. 农业工程学报, 2012, 28(1): 238-243.
[26] 张笑楠, 王克林, 张伟, 陈洪松, 何寻阳. 桂西北喀斯特区域生态环境脆弱性. 生态学报, 2009, 29(2): 749-757.
[27] 赤水县综合农业区划编写组. 赤水县综合农业区划. 贵阳: 贵州人民出版社, 1989: 1-132.
[28] 钱凤魁, 董婷婷, 王秋兵. 低山丘陵区不同坡度级耕地景观格局特征分析. 沈阳农业大学学报, 2013, 44(6): 766-770.
[29] 王平, 卢珊, 杨桄, 刘湘南. 地理图形信息分析方法及其在土地利用研究中的应用. 东北师大学报: 自然科学版, 2002, 34(1): 93-99.
[30] 李娶, 朱金兆, 朱清科. 分形维数计算方法研究进展. 北京林业大学学报, 2002, 24(2): 71-78.
[31] 郄瑞卿, 刘富民. 基于分形理论的土地利用景观格局变化研究——以镇赉县镇赉镇为例. 水土保持研究, 2013, 20(2): 217-222.
[32] 杨青生, 乔纪纲, 艾彬. 快速城市化地区景观生态安全时空演化过程分析——以东莞市为例. 生态学报, 2013, 33(4): 1230-1239.
[33] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰麟. 景观生态学原理及应用. 北京: 科学出版社, 2001.
[34] 高杨, 黄华梅, 吴志峰. 基于投影寻踪的珠江三角洲景观生态安全评价. 生态学报, 2010, 30(21): 5894-5903.
[35] 王千, 金晓斌, 周寅康. 江苏沿海地区耕地景观生态安全格局变化与驱动机制. 生态学报, 2011, 31(20): 5903-5909.
[36] 牛海鹏. 基于生态位理论的耕地数量变化及其驱动力研究——以焦作市为例[D]. 焦作: 河南理工大学, 2005.
[37] 吴小节, 杨书燕, 汪秀琼. 中国生态文明重心转移的特征及影响因素. 城市问题, 2016, (5): 27-34.